

文章编号: 1000-4750(2013)07-0180-07

地震作用下冷弯薄壁型钢结构房屋 弹塑性位移简化计算研究

吴函恒¹, 周天华¹, 石宇¹, 陈军武^{1,2}

(1. 长安大学建筑工程学院, 西安 710061; 2. 西安有色冶金设计研究院, 西安 710001)

摘 要: 针对地震作用下冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性位移的简化计算, 基于层间剪切模型和冷弯薄壁型钢组合墙体的恢复力模型, 对2层~7层冷弯薄壁型钢结构房屋进行弹塑性时程分析。通过对滞回耗能沿楼层高度分布规律的研究, 确定了冷弯薄壁型钢结构房屋薄弱楼层的位置; 研究了楼层屈服剪力系数、楼层数、结构自振周期和不同地震记录对弹塑性层间位移增大系数的影响; 通过大量参数统计分析, 提出了冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性层间位移增大系数与楼层屈服剪力系数和楼层数的定量关系, 为罕遇地震作用下冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性位移验算提供依据。

关键词: 冷弯薄壁型钢结构房屋; 弹塑性位移; 位移增大系数; 简化计算; 恢复力模型

中图分类号: TU392.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.04.0223

SIMPLIFIED CALCULATION OF ELASTOPLASTIC DISPLACEMENT FOR COLD-FORMED THIN-WALLED STEEL BUILDINGS UNDER EARTHQUAKES

WU Han-heng¹, ZHOU Tian-hua¹, SHI Yu¹, CHEN Jun-wu^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Xi'an Research Institute of Nonferrous Metallurgy, Xi'an 710001, China)

Abstract: Based on a shearing storey model and a hysteretic model of cold-formed thin-walled steel stud walls, the simplified calculation of the elastoplastic displacement for cold-formed thin-walled steel buildings is studied by the elastoplastic time history analysis on two-storey buildings to seven-storey buildings. The weak storey is suggested by analyzing the distribution of hysteretic energy in the height of a storey. The influences of storey yielding shear force factors, storey numbers, fundamental periods of structures and different seismic records on elastoplastic displacement amplification factors are studied. The quantitative relations among storey yielding shear force factors, storey numbers and elastoplastic displacement amplification factors are proposed to estimate the elastoplastic displacement for cold-formed thin-walled steel buildings under rare earthquakes.

Key words: cold-formed thin-walled steel buildings; elastoplastic displacement; displacement amplification factors; simplified calculation; hysteretic model

冷弯薄壁型钢结构房屋体系因其自重轻、施工周期短、节能环保、产业化生产等优点, 在我国开始得到应用, 并呈现出由低层向多层的发展趋势。《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[1]以验算薄

弱楼层的弹塑性变形作为结构在罕遇地震作用下的设计方法。然而, 对于冷弯薄壁型钢结构体系, 国内外对其弹塑性位移计算的研究尚属少见, 《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227-2011)^[2]

收稿日期: 2012-04-01; 修改日期: 2012-11-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012TD012)

通讯作者: 吴函恒(1984—), 男, 河南平顶山人, 博士生, 从事钢结构理论与应用研究(E-mail: wuhanheng@163.com)。

作者简介: 周天华(1963—), 男, 陕西西乡人, 教授, 博士, 博导, 从事钢结构、组合结构基本理论及应用研究(E-mail: zhouth163@163.com);

石宇(1978—), 女(苗族), 湖北宣恩人, 副教授, 博士, 主要从事轻型钢结构理论与应用研究(E-mail: shiyu7811@163.com);

陈军武(1968—), 男, 陕西商洛人, 高工, 博士生, 主要从事钢结构设计与研究(E-mail: chjw605@163.com)。

亦无相关规定。因此,研究提出实用的弹塑性层间位移计算方法是抗震设计亟需解决的问题。

对于结构弹塑性位移的简化计算,国内外学者提出较多的是弹塑性层间位移增大系数(如下式所示)的估算建议:

$$Du_p = h_p Du_e \quad (1)$$

式中: Δu_p 为弹塑性层间位移; Δu_e 为罕遇地震作用下按弹性分析的层间位移; h_p 为弹塑性位移增大系数。

20 世纪 80 年代,国内学者基于多层剪切模型提出了钢筋混凝土框架结构弹塑性层间位移的简化计算方法^[3-5];文献[6]统计分析得出钢框架结构体系弹塑性层间位移增大系数简便计算建议;文献[7-8]基于能量概念对剪切型多自由度体系进行大量弹塑性分析,统计得出了楼层弹塑性位移增大系数与屈服剪力系数关系的公式。

本文采用三维弹塑性结构分析计算机软件 CANNY 对 2 层~7 层该体系房屋,选取合理参数进行大量而系统的弹塑性时程分析,对弹塑性位移增大系数的影响因素以及薄弱层位置的确定等方面进行研究,并得到弹塑性层间位移增大系数实用计算建议。

1 分析模型及参数确定

1.1 层间剪切分析模型

冷弯薄壁型钢结构房屋体系是墙体式受力体系,冷弯薄壁型钢组合墙体承担水平和竖向荷载,且在楼盖处不连续。文献[9]墙体试验研究表明:在水平荷载作用下,冷弯薄壁型钢组合墙体主要发生剪切变形;文献[10]三层冷弯薄壁型钢房屋振动台试验表明:水平地震作用下,结构整体以剪切变形为主,冷弯薄壁型钢房屋结构体系的变形主要为集中质量层之间的水平错动。因此,本文将分析模型简化为层间剪切模型,如图 1 所示。

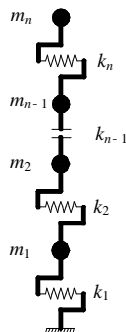


图 1 分析模型

Fig.1 Analysis model

1.2 恢复力模型

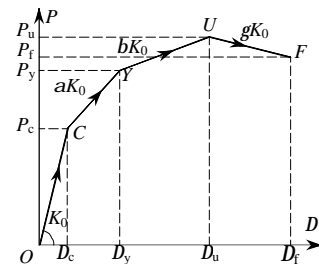
冷弯薄壁型钢组合墙体在加载过程中表现出强度和刚度退化、较为明显的“捏拢”和“滑移”等特征^[9,11]。

CANNY 软件中提供的 CA4 型恢复力模型可模拟强度、刚度的退化和“捏拢”、“滑移”等效应。CA4 型恢复力模型的骨架曲线如图 2(a)所示。OC 段为弹性阶段, C 点定义为弹性点, 对应的弹性荷载为 P_c , K_0 为弹性刚度, 弹性位移 $D_c=P_c/K_0$; CY 段为屈服阶段, Y 点为屈服点, 对应屈服荷载为 P_y , 屈服位移为 D_y , 屈服段的刚度 $K_1=aK_0$; YU 段为强化阶段, U 点为最大荷载点, P_u 和 D_u 分别为最大荷载和与其对应的位移, 其中, $D_u=mD_y$, 强化段的刚度 $K_2=bK_0$; UF 为破坏阶段, P_f 和 D_f 分别为破坏荷载和与其对应的位移, 强化段的刚度 $K_3=gK_0$ 。

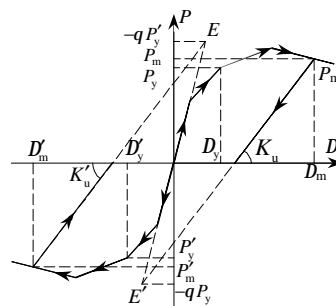
CA4 型恢复力模型的卸载刚度退化规则如图 2(b)所示。定义 E 和 E' 点为目标点, 卸载路径直接指向 E(E') 点。其中, $P_m(P'_m)$ 和 $D_m(D'_m)$ 分别为卸载起点对应的荷载和位移, θ 为卸载刚度退化参数 ($\theta \geq 1$), K_u 和 K'_u 为两个方向的卸载刚度, 可表达为:

$$\begin{cases} K_u = \frac{qP_y + P_m}{qP_y/K_0 + D_m} \\ K'_u = \frac{qP'_y + P'_m}{qP'_y/K_0 + D'_m} \end{cases} \quad (2)$$

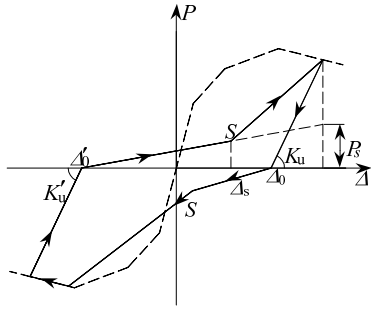
CA4 型恢复力模型的“捏拢”行为如图 2(c)所示。定义控制“捏拢”和“滑移”的目标点 S 点(P_s ,



(a) 骨架曲线



(b) 卸载刚度退化



(c) 捏拢及滑移规则

图 2 CA4 恢复力模型

Fig.2 Restoring force model of CA4

Δ_s), P_s 和 Δ_s 可表达为:

$$\begin{cases} \Delta_s = \Delta'_0 + \delta(\Delta_0 - \Delta'_0) \\ P_s = \lambda P_u \end{cases} \quad (3)$$

其中: Δ_0 与 Δ'_0 为卸载曲线与坐标轴的交点, λ 和 δ 为两个控制的参数($0 \leq \lambda \leq 1$, $0 \leq \delta \leq 1$): λ 控制“捏拢”效应, δ 控制“滑移”效应。

本文参照冷弯薄壁型钢组合墙体的试验数据^[9], 回归得出单面石膏板、单面 OSB 板和双面板 (OSB 板+石膏板)冷弯薄壁型钢组合墙体基于 CA4 型恢复力模型的相关系数, 如表 1 所示。将得到的冷弯薄壁型钢组合墙体恢复力曲线简化模型与试验得到水平荷载与位移滞回曲线进行对比, 如图 3 所示。两者吻合较好, 耗能能力相当, 从而验证了本文恢复力模型的正确性。

表 1 冷弯薄壁型钢组合墙体恢复力模型系数确定

Table 1 The coefficients of restoring force model for cold-formed thin-walled steel stud walls

墙体类型	$K_0/$ (kN/m)	$P_c/$ kN	$P_y/$ kN	α	β	γ	μ	θ	δ	λ
单面石膏板墙体	967.2	3.54	7.57	0.259	0.057	-0.053	2.89	10.2	0.82	0.25
单面OSB板墙体	2713.3	9.77	20.25	0.326	0.098	-0.075	2.16	7.6	0.69	0.19
双面板墙体	3802.7	11.18	24.20	0.293	0.078	-0.063	2.67	9.1	0.75	0.20

因此, 本文采用考虑刚度、强度退化和“捏拢”、“滑移”效应在内的 CA4 型恢复力模型进行弹塑性时程分析。

1.3 振动台试验的验证

参照文献[10]三层冷弯薄壁型钢结构房屋的振动台试验模型, 本文采用三维弹塑性结构分析计算机软件 CANNY, 并基于 1.1 节层间剪切模型和 1.2 节墙体恢复力模型进行相同地震波下的动力时程分析。结构阻尼比根据 JGJ 227-2011 取为 0.03。

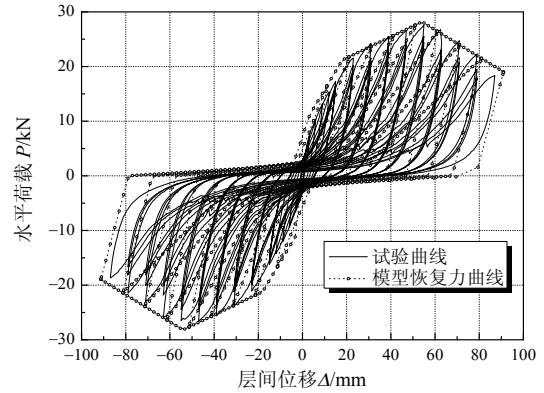


图 3 模型恢复力曲线与试验曲线对比

Fig.3 Comparison of hysteretic curves between models and tests

分析得到结构的自振周期、加速度反应以及位移反应, 与试验结果进行对比, 如表 2 所示。通过对比分析可以看出: 采用简化模型分析得到的结果与试验结果的误差在 10%以内, 精度较好, 从而验证了本文分析模型的正确性。

表 2 简化模型结果与试验结果对比

Table 2 Comparison of simplified model results and test results

对比项	试验结果	简化模型结果	误差/(%)	备注
自振周期/s	0.198	0.216	9.09	—
基底剪力/kN	25.75	23.61	8.31	8 度多遇
加速度/gal	1153.9	1085.2	5.95	8 度罕遇/顶层
最大层间位移角	1/178	1/197	9.52	8 度罕遇

注: 对比结果是在 EL Centro 波作用下。

1.4 统计参数的确定

本文采用 CANNY 软件对质量和刚度沿房屋高度分布均匀的冷弯薄壁型钢结构房屋体系进行大量弹塑性时程分析, 结构阻尼比取 0.03^[2], 以期求得该类房屋体系在强震作用下薄弱层位置以及弹塑性层间位移增大系数的变化规律, 为罕遇地震下冷弯薄壁型钢房屋体系层间变形验算提供建议。选取的参数如下:

1) 楼层屈服剪力系数 ξ_y : 分别取为 1.0~0.3($\xi_y=1.0$ 时为弹性)。

2) 结构层数 N : 分别取 2 层~7 层, 层高取 $H=3m$ 。

3) 结构周期 T : 按照 JGJ 227-2011 的结构周期计算公式 $T=0.02H\sim 0.03H$, H 为房屋高度, 本文分析时取 $0.02H$ 、 $0.025H$ 、 $0.03H$ 三种周期模式。

4) 地震记录: 考虑不同场地类别的地震记录差异, 本文选取 I~IV 场地, 每类场地 5 条地震记录, 共 20 条地震记录。

在上述统计参数的基础上, 共计算 $8 \times 6 \times 3 \times 20 = 2880$ 个算例。

2 薄弱楼层位置的确定

大量弹塑性时程分析表明：各楼层弹塑性层间变形分布往往是不均匀的，存在塑性变形集中楼层，即薄弱楼层。找到薄弱楼层并控制其层间变形，从而提高结构的抗倒塌能力。

地震作用下结构的能量方程可以表示为：

$$E_1 = E_K + E_D + E_S + E_H \quad (4)$$

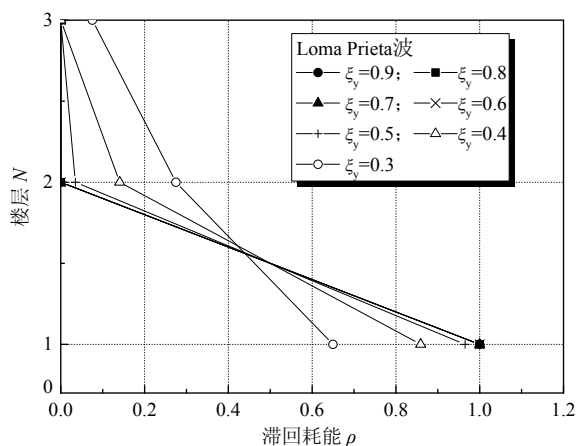
式中： E_1 为结构体系总能量输入； E_K 为结构的动能； E_D 为阻尼耗能； E_S 为弹性应变能； E_H 为滞回耗能。其中，动能和弹性应变能只参与结构能量的转化，不参与结构能量的吸收，在地震动结束时为零。因此，结构体系的滞回耗能和阻尼耗能能力决定其抗震能力。而楼层的塑性变形在薄弱楼层的集中也就意味着地震输入的能量在该楼层的集中。文献[12]对结构累计损伤分析表明：滞回耗能可量化结构单元所消耗的能量并决定楼层最大位移反应。因此，通过滞回耗能沿高度分布规律可确定结构薄弱层的位置。

定义滞回耗能率 ρ 来分析冷弯薄壁型钢结构房屋体系的滞回耗能沿高度分布规律，如下式所示：

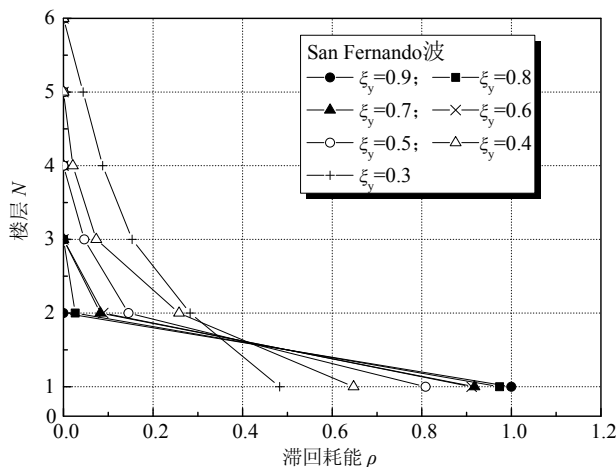
$$\rho = E_{Hi} / \sum_{i=1}^N E_{Hi} \quad (5)$$

其中： E_{Hi} 为第 i 层的滞回耗能； N 为楼层数； $\sum_{i=1}^N E_{Hi}$ 为结构总的滞回耗能。

通过本文大量时程分析，冷弯薄壁型钢房屋各楼层的滞回耗能沿房屋高度分布的一般规律如图 4 所示。



(a) 三层($T=0.18s$)



(b) 六层($T=0.45s$)

图 4 滞回耗能 ρ 沿楼层 N 分布规律

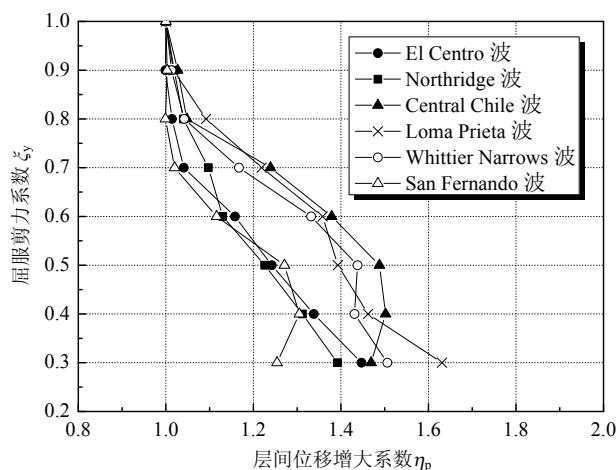
Fig.4 Distributions of hysteretic energy along storey

分析图 4 可以看出：对质量和刚度沿房屋高度分布均匀的冷弯薄壁型钢房屋，滞回耗能集中在结构的底层，且从底层到顶层呈递减趋势。因此，底层为结构的薄弱楼层。

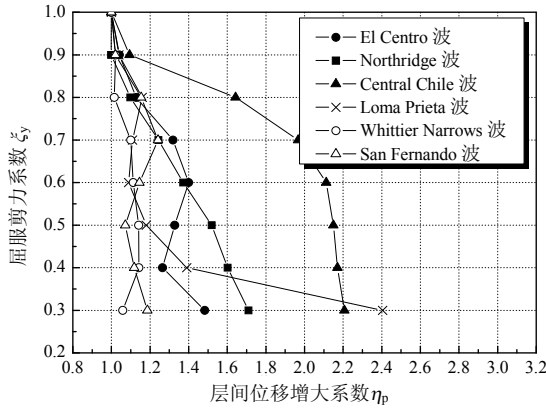
3 弹塑性位移增大系数影响因素分析

3.1 楼层屈服剪力系数的影响

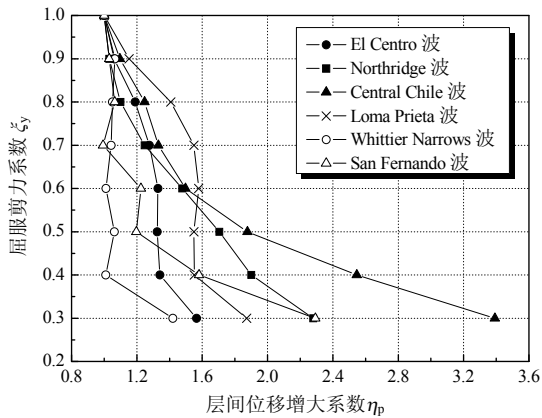
楼层屈服剪力系数是影响结构弹塑性变形的主要因素^[5-6]。本文大量弹塑性时程分析表明：冷弯薄壁型钢房屋的弹塑性层间位移增大系数 η_p 随着楼层屈服剪力系数(ξ_y)的减小呈现增大趋势。但是由于不同地震记录频谱的差异性， η_p 随着 ξ_y 减小而增大的走势不同，如图 5 所示。



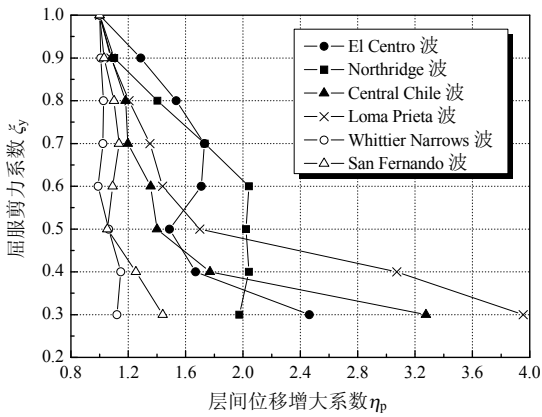
(a) 三层结构($T=0.225s$)



(b) 五层结构(T=0.375s)



(c) 六层结构(T=0.45s)



(d) 七层结构(T=0.525s)

图5 弹性位移增大系数 η_p 随屈服剪力系数 ξ_y 的变化趋势楼层

Fig.5 Variation of elastoplastic displacement amplification factors with storey yielding shear force factors

3.2 楼层数的影响

通过本文分析：结构楼层数对弹性层间位移增大系数 η_p 影响较大。 η_p 随楼层数的增大而增大，如图 6 所示。从能量分配角度解释：多自由度体系(MDOFS)的地震动输入总能量 E_1 仅取决于体系的质量和初始刚度^[13]，当 E_1 为一定时，随着结构自由度的增加，每个楼层所分配的能量随之降低，即能量集中的阈值降低，则能量在薄弱层集中的放大

效应也就随之增大。

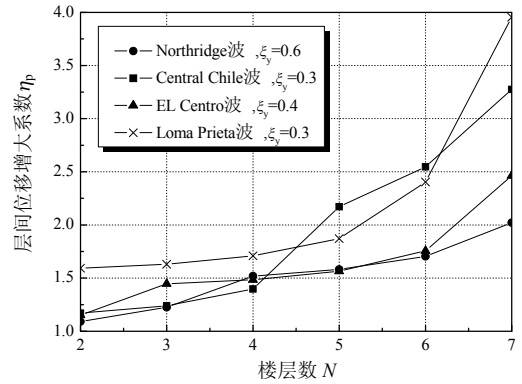
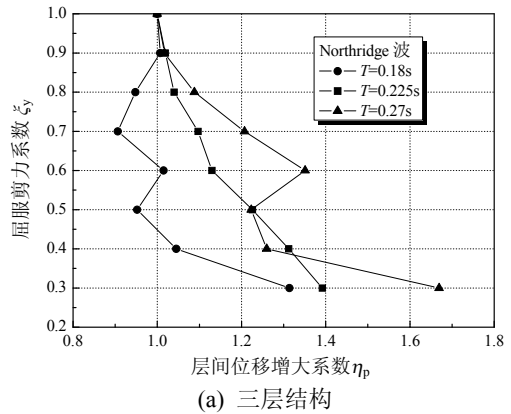


图6 弹性位移增大系数 η_p 随楼层数的变化趋势

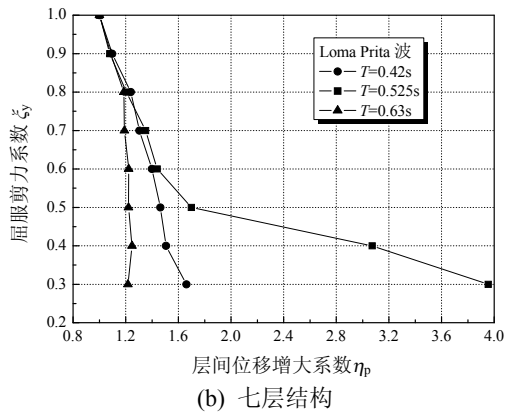
Fig.6 Variation of elastoplastic displacement amplification factors with the number of storey

3.3 结构自振周期的影响

文献[2]给出冷弯薄壁型钢房屋的自振周期为 $T=0.02H\sim 0.03H$ 。2层~7层该体系房屋的自振周期小于 0.65s，属于中短周期。本文大量分析表明：结构自振周期对弹性层间位移增大系数有一定的影响，但没有什么特定的规律。随着结构的层数，楼层屈服剪力系数和地震波特性的不同而不同，如图 7 所示。



(a) 三层结构



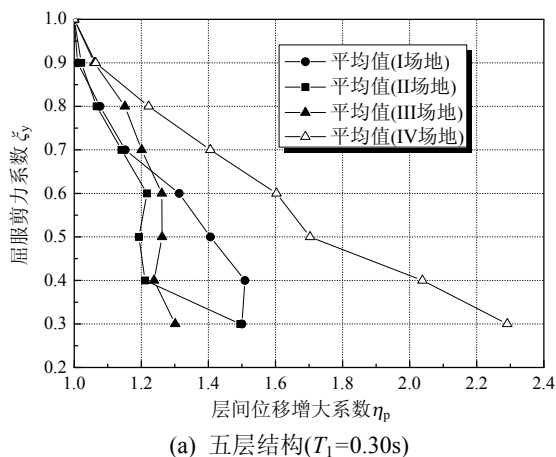
(b) 七层结构

图7 弹性位移增大系数 η_p 随结构自振周期的变化趋势

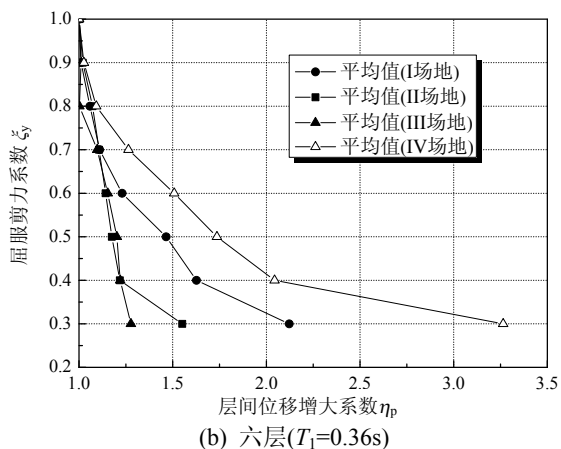
Fig.7 Variation of elastoplastic displacement amplification factors with the natural period

3.4 不同地震记录的影响

基于 I-IV 场地, 每类场地 5 条地震记录的弹塑性时程分析, 研究发现: 冷弯薄壁型钢结构房屋在 IV 类场地地震记录作用下, 结构弹塑性层间位移的增大系数较大, 如图 8 所示。这是由于多层冷弯薄壁型钢房屋的自振周期 $T \leq 0.65s$, 属于中短周期, 而 IV 类场地地震记录的特征周期 $T_g \geq 0.65s$, 结构自振周期小于地震记录的特征周期, 结构弹塑性层间位移的增大系数较大。



(a) 五层结构($T_1=0.30s$)



(b) 六层($T_1=0.36s$)

图 8 弹塑性位移增大系数 η_p 随不同地震记录的变化趋势
Fig.8 Variation of elastoplastic displacement amplification factors with different seismic records

4 弹塑性位移增大系数计算建议

针对冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性位移增大系数的计算, 本文在对 2880 个算例统计的基础上, 从实用设计计算考虑, 并考虑结构自振周期和不同地震记录差异性引起结构地震位移反应的差异性, 取结构弹塑性位移增大系数的统计结果的平均值加上一倍的方差作为设计计算依据^[6], 其保证率约为 84%。得到冷弯薄壁型钢结构房屋弹塑性层间位移增大系数建议取值, 见表 3。建议值与楼层屈服剪力系数(ξ_y)

和结构层数(N)的变化规律曲线如图 9 所示。

表 3 弹塑性层间位移增大系数建议值

Table 3 Recommended value of elastoplastic displacement amplification factors

总层数	ξ_y					
	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
2	1.17	1.18	1.17	1.20	1.21	1.24
3	1.20	1.22	1.24	1.28	1.32	1.40
4	1.24	1.28	1.33	1.38	1.45	1.62
5	1.29	1.34	1.45	1.51	1.62	1.92
6	1.35	1.43	1.60	1.68	1.86	2.38
7	1.43	1.54	1.83	1.94	2.22	3.12

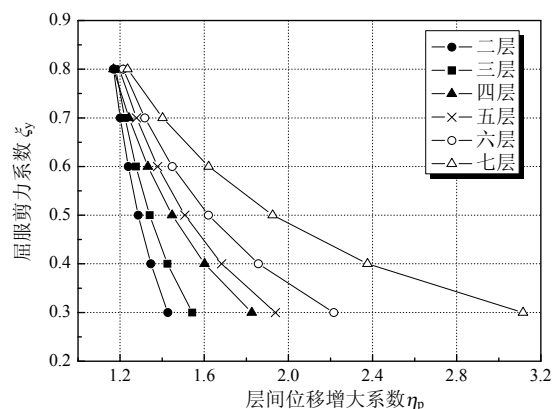


图 9 弹塑性层间位移增大系数建议值变化趋势

Fig.9 Variation of recommended value for elastoplastic displacement amplification factors

以五层房屋为例, 将本文提出的冷弯薄壁型钢房屋弹塑性位移增大系数与 GB50011-2010、文献[3-4,8]针对钢筋混凝土框架结构以及剪切型多自由度体系的弹塑性位移增大系数的建议值进行对比, 比较关系曲线如图 10 所示。

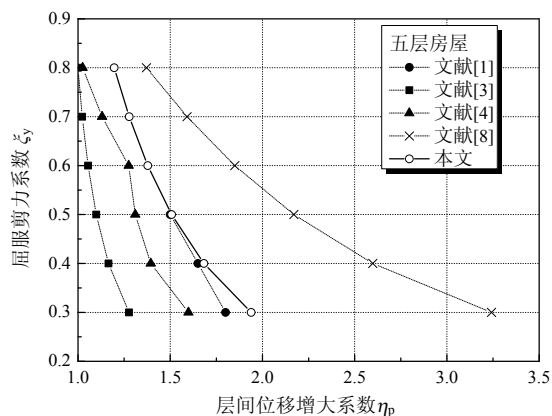


图 10 不同研究结果的比较

Fig.10 Comparison among different research results

通过对比分析可以看出: 本文统计提出的冷弯薄壁型钢房屋弹塑性位移增大系数与 GB50011-2010 以及文献[3-4]给出的增大系数相比, 结果偏大, 而比文献[8]基于能量法的结果偏小。这是由于冷弯薄壁型钢结构房屋的自振周期约为 $T=0.02H \sim$

0.03H, 2层~7层该体系房屋的自振周期小于0.65s, 属于中短周期, 文献[8]的研究模型仅限于中长周期; 冷弯薄壁型钢组合墙体的恢复力曲线“捏拢”和“滑移”效应严重, 能量耗散系数约为0.8~1.1^[9,14], 耗能性能较差等原因引起的。

5 结论

基于冷弯薄壁型钢组合墙体恢复力模型, 采用层间剪切模型对冷弯薄壁型钢房屋进行大量弹塑性动力时程分析, 得出如下结论:

(1) 结构楼层剪力屈服系数和结构楼层数是影响结构弹塑性层间位移的增大系数的因素, 弹塑性层间位移增大系数随着楼层剪力屈服系数的减小和楼层数量的增加而增大。

(2) 结构自振周期和场地条件对结构弹塑性层间位移的增大系数有一定的影响。多层冷弯薄壁型钢房屋周期($T \leq 0.65s$)属于中短周期, 该结构在IV类场地地震记录($T_g \geq 0.65s$)作用下, 结构弹塑性层间位移的增大系数较大。

(3) 通过分析滞回耗能沿房屋高度分布规律, 对质量和刚度沿房屋高度均匀分布的冷弯薄壁型钢房屋, 底层为能量集中的薄弱楼层。

(4) 在对2880个弹塑性时程分析的基础上, 从实用设计计算考虑, 统计得出2层~7层冷弯薄壁型钢房屋弹塑性层间位移增大系数与楼层数、楼层屈服剪力系数的关系, 可估算质量和刚度沿高度均匀分布的冷弯薄壁型钢房屋在罕遇地震作用下的弹塑性层间位移。

参考文献:

- [1] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [2] JGJ 227-2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ 227-2011, Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [3] 何广乾, 魏琰, 戴国莹. 论地震作用下多层剪切型结构的弹塑性变形计算[J]. 土木工程学报, 1982, 15(3): 10-19.
He Guangqian, Wei Lian, Dai Guoying. On elasto-plastic deformations of multi-story shear type structures due to earthquake effect [J]. China Civil Engineering Journal, 1982, 15(3): 10-19. (in Chinese)
- [4] 陈光华. 地震作用下多层剪切型结构弹塑性位移反应的简化计算[J]. 建筑结构学报, 1984, 5(2): 45-57.
Chen Guanghua. Simplified calculation of elastoplastic story drift responses of multi-story shear type structures subjected to earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 1984, 5(2): 45-57. (in Chinese)
- [5] 高小旺. 地震作用下多层剪切型结构弹塑性位移反应的实用计算方法[J]. 土木工程学报, 1984, 17(3): 79-87.
Gao Xiaowang. Applied method of seismic inelastic response of lumped mass MDOF system [J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(3): 79-87. (in Chinese)
- [6] 李国强, 冯健. 罕遇地震下多高层建筑钢结构弹塑性位移的实用计算[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 77-83.
Li Guoqiang, Feng Jian. A practical approach for estimating elastoplastic displacements of multistory and tall steel buildings under severe earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(1): 77-83. (in Chinese)
- [7] Ye L P, Otani S. Maximum seismic displacement of inelastic systems based on energy concept [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1999(6): 1483-1499.
- [8] 经杰, 叶列平, 钱稼茹. 基于能量概念的剪切型多自由度体系弹塑性地震位移反应分析[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 31-37.
Jing Jie, Ye Lieping, Qian Jiaru. Inelastic seismic response of lumped mass MDOF systems based on energy concept [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 31-37. (in Chinese)
- [9] 周天华, 石宇, 何保康, 等. 冷弯型钢组合墙体抗剪承载力试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(1): 83-88.
Zhou Tianhua, Shi Yu, He Baokang, et al. Experimental research on the shear resistance of cold-formed steel stud composed wall [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006, 38(1): 83-88. (in Chinese)
- [10] 黄智光, 苏明周, 何保康, 等. 冷弯薄壁型钢三层房屋振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 73-81.
Huang Zhiguang, Su Mingzhou, He Baokang, et al. Shaking table test on seismic behaviors of three-story cold-formed thin-wall steel residential buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(2): 73-81. (in Chinese)
- [11] Serrette R L, Ogunfuni K. Shear resistance of gypsum-sheathed light gauge steel stud walls [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 386-389.
- [12] Seneviratna G D P K, Krawinkler H. Evaluation of inelastic MDOF effects for seismic design [R]. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University: Report No.120, 1997.
- [13] Akiyama Hiroshi. Earthquake-resistant limit-state design for building [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985.
- [14] 石宇, 周绪红, 聂少峰, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊): 124-129.
Shi Yu, Zhou Xuhong, Nie Shaofeng, et al. Research on the seismic performance of cold-formed steel stud wall [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl): 124-129. (in Chinese)